

■ 講座

海洋音響計算サイト

<http://www.tsuchiya2.org> の作成・運用土屋 利雄 (海洋研究開発機構 / 東京海洋大) *¹

1. はじめに

近年, インターネット上に WEB プログラミングを利用した様々な分野の計算サイトが構築され, 学術的・教育的な普及に大きく貢献している。しかし, 海洋音響の研究に利用できる計算サイトは作成されてこなかった。そこで, 筆者は, 海洋音響の研究者が海中の音速と吸収減衰(伝搬損失)を容易に計算できるサイト(<http://www.tsuchiya2.org>)を作成し, インターネット上に公開した。このサイトで計算できる項目は, 様々な海中音速の算出式(Mackenzie, Coppens, Del Grosso, UNESCO (Chen and Millero))による海中の音速と様々な吸収減衰の算出式(Thorp, Shulkin and Marsh, Fisher and Simmon, Francois and Garrison, Ainslie and McCollm)による海水中的の吸収損失/伝搬減衰である。このサイトでは, D, T, S(水深, 水温, 塩分)や周波数及び pH などの値を入力することによりそれぞれの算出式からの計算値がユーザーのブラウザに出力される。また, ユーザーが用意した D, T, S ファイル(CSV)をアップロードすることにより, 深度方向の音速や減衰プロファイルを計算でき, 併せて平均値も求めることができる。

2. WEB プログラミングによる計算サイト

2.1 WEB プログラミングの特徴

従来, 数値計算用プログラミング言語として

FORTRAN, C, BASIC などのコンパイル型の言語が使われてきたが, それらの言語は, 各々に固有のコンパイラが必要であり, さまざまな OS (MS Windows, Mac OS, Unix など)すべてで実行できるプログラムの作成は, 事実上困難であった。さらに, OS のバージョンアップや CPU の高性能化に対し適切に対応できないため再コンパイル等ができなくなることが多かった。

一方, インターネットやイントラネットを利用する WEB プログラミング言語(Java, Perl, Ruby, PHP など)は, インタプリタ型の言語であり, WEB サーバ上に計算サイトを構築することにより, ユーザー側のブラウザ(IE, Safari, Fire Fox など)を介してプログラムが実行されるため, 全くコンパイラを必要とせず, OS や CPU の違いに関係なく利用できる。また, 計算サイトを公開することにより誰でもインターネットを介して利用できる利点もある。

本研究では, このような WEB プログラミングの可能性に着目し, 海洋音響の基本的な要素である海水中的の音速と吸収損失を簡易に計算できる WEB 計算サイト(<http://www.tsuchiya2.org>)をインターネット上に公開した。

2.2 PHP によるプログラミング

本研究で使った PHP¹⁾(PHP: Hypertext Preprocessor)

は、HTML (Hyper Text Markup Language) データを生成し、動的な WEB ページを実現することを主な目的としたプログラミング言語処理系である。PHP の実体は、Fig. 1 の概念図に示したように、WEB サーバ上に置かれるソフトウェアの Apache モジュールとして動作するスクリプト言語を実行する環境である。HTML 文書中に記述されたスクリプトを PHP が実行し、結果を HTML データとして WEB ブラウザに出力する。PHP は、WEB アプリケーション開発に特化した言語であり、WEB サーバ上で動作し、HTML ファイル内に直接コードを記述できる²⁾。したがって、サーバ上の文書が要求されるたびに文書に記述された PHP のプログラムを実行し、その結果は、インターネットを介して WEB ブラウザに送信される。送信データは、HTML であるため Unix 系、MS Windows、Mac OS など主要な OS で Internet Explorer、Fire Fox、Safari などのさまざまな WEB ブラウザにより動作する。また、PHP は、オープンソースであるため Apache 等のほとんどの WEB サーバでは、Xampp³⁾ などフリーモジュールをインストールすることにより容易に導入することができる。PHP は、テキストベースで記述する HTML ファイルに埋め込む言語であるため、簡単なテキストエディタがあれば簡単に記述でき、CGI のようなサーバ負担も少ないため実行が早い。また、標準で 14 桁の浮動少数点の数値を扱え、数値計算のため演算

関数も多数用意されていることから、広く科学技術計算などに適した言語であるといえる。

3. 海洋音響計算プログラム

3.1 海中の音速計算プログラム

海中の音速値は、海洋音響の最も重要なパラメータの一つであり、音響測深器や魚群探知器などの距離を計測する音響機器や音響トモグラフィ観測等には、精度の向上に正確な計算値が必要である。

音速の算出式は海水の体積弾性率と密度の関係式として表される⁴⁾。したがって、海水のわずかな圧縮の変化と水温と塩分による密度の変化が音速を変える。

音速の算出式としては、古くから水温 $T(^{\circ}\text{C})$ と塩分 $S(\%)$ 水深 $D(\text{m})$ または圧力 $P(\text{atm})$ の関数として様々な実験式(現場式)が主に Journal of the Acoustical Society of America などでも多く提唱されてきた。これらは簡易式として、Mackenzie (1981)⁵⁾ や Coppens (1981)⁶⁾、厳密式として、Del Grosso (1974)⁷⁾ や Chen and Millero (1977)⁸⁾ などが有名である。現在、広く用いられている算出式は、Chen and Millero の厳密式を基に UNESCO⁹⁾ で制定された多くの定数を持つ (2) 式のような、複雑な多項式である。(各定数は省略、WEB サイトに記載した。)

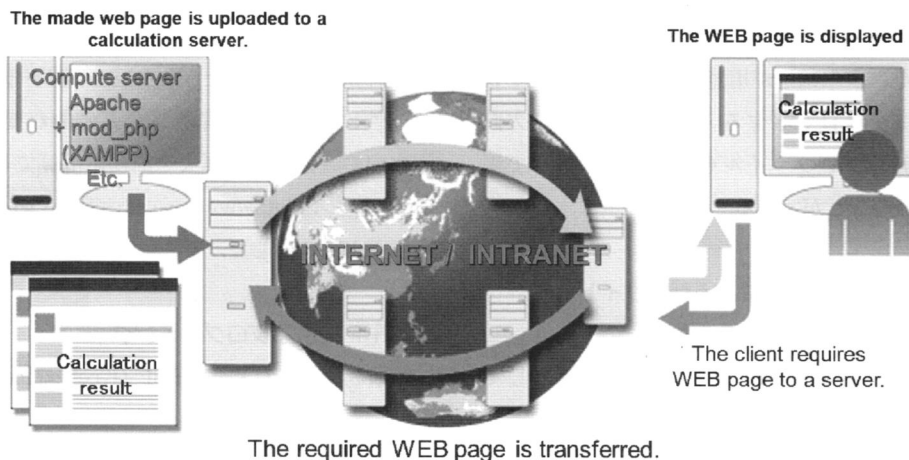


Fig. 1 WEB 計算サーバの概念図

$$\begin{aligned}
c(S, T, P) &= Cw(T, P) + A(T, P)S + B(T, P)S^{3/2} + D(T, P)S^2 \\
Cw(T, P) &= (C_{00} + C_{01}T + C_{02}T^2 + C_{03}T^3 + C_{04}T^4 + C_{05}T^5) \\
&\quad + (C_{10} + C_{11}T + C_{12}T^2 + C_{13}T^3 + C_{14}T^4)P \\
&\quad + (C_{30} + C_{31}T + C_{32}T^2)P^3 \\
A(T, P) &= (A_{00} + A_{01}T + A_{02}T^2 + A_{03}T^3 + A_{04}T^4) \\
&\quad + (A_{10} + A_{11}T + A_{12}T^2 + A_{13}T^3 + A_{14}T^4)P \\
&\quad + (A_{20} + A_{21}T + A_{22}T^2 + A_{23}T^3)P^2 \\
&\quad + (A_{30} + A_{31}T + A_{32}T^2)P^3 \\
B(T, P) &= B_{00} + B_{01}T + (B_{10} + B_{11}T)P \\
D(T, P) &= D_{00} + D_{10}P
\end{aligned} \quad (2)$$

なお、(2)式の有効範囲は、 $T = 0 \sim 40^\circ\text{C}$ 、 $S = 0 \sim 40$ psu、 $P = 0 \sim 100$ MPa とほぼ海洋全域の環境を網羅している。しかし、Meinen¹⁰⁾、Dushaw¹¹⁾、Leroy¹²⁾らは、最新の計測値を基にこの UNESCO の式を修正する提案を行っている。なお、本計算サイトの作成に当たって、圧力 P は、重力の影響を考慮し、文献(9)に基づいて緯度 45° の標準重力に換算してある。また、水温スケールは、1990 年国際温度スケール ITS-90¹⁴⁾ を使用した。

3.2 海中の吸収損失計算プログラム

海中を伝搬する音波は音源から拡散による減衰(拡散減衰 TL)と伝搬経路に存在する海水(真水、B(OH), MgSO_4)固有の吸収損失 α (dB/km) を受ける。 α は、ソーナーの設計には不可欠な最も基本的な要素であり、従来から様々な測定値を基に多くの算出式が提唱されてきた。

音速算出の簡易式としては、Thorpe (1961)¹⁵⁾、厳密式として、Schulkin and Marsh (1962)¹⁶⁾、Fisher and Simmon (1977)¹⁷⁾、Francois and Garrison (1982)^{18), 19)} 及び Ainslie and McColm (1997)²⁰⁾ らの式が使われており、深海域での実測値も報告²¹⁾ されている。厳密式とされる Schulkin and Marsh, Fisher and Simmon, Francois and Garrison 及び Ainslie and McColm の各式における海水中の吸収損失 α (dB/km) は、(3)式において、ホウ酸の寄与(第1項)と硫酸マグネシウムの寄与(第2項)と真水の寄与(第3項)の合成として表される。

$$\alpha = \frac{A_1 P_1 f_1 f^2}{f^2 + f_1^2} + \frac{A_2 P_2 f_2 f^2}{f^2 + f_2^2} + A_3 P_3 f^2 \quad (3)$$

それぞれの式によって各々係数が異なるが、(4)式では、Francois and Garrison の式における各係数を示す。ここで、 f_1 , f_2 はホウ酸と硫酸マグネシウムの緩和周波数、 P_1, P_2, P_3 は圧力依存、 A_1, A_2, A_3 は水の特性で変化する定数項である。 A_1 は海水の pH により変化し、 A_2 は塩分とともに増加し、 A_3 は温度が上がるとう減少する。 f_1 は温度と塩分で変化し、 f_2 は温度とともに増加する。ここで、 $\theta = 273 + T(^{\circ}\text{C})$ 、 c は音速、pH は水素イオン濃度、 f は周波数(kHz)、 S は塩分(‰)、 T は水温($^{\circ}\text{C}$)、 D は水深(m)である。

ただし、この式の有効範囲は、周波数 10 k ~ 500 kHz において、 $-2 < T < 22(^{\circ}\text{C})$ 、 $30 < S < 35$ (‰)、 $0 < D < 3.5$ km である。

$$A_1 = \frac{8.86}{c} \times 10^{(0.78 \text{ pH} - 5)} \quad (\text{dB/km kHz})$$

$$P_1 = 1$$

$$f_1 = 2.8 (S/35)^{0.5} 10^{(4 - 1245/\theta)} \quad (\text{kHz})$$

$$C = 1412 + 3.21 T + 1.19 S + 0.0167 D \quad (\text{m/s})$$

$$A_2 = 21.44 \frac{S}{C} (1 + 0.025 T) \quad (\text{dB/km kHz})$$

$$P_2 = 1 - 1.37 \times 10^{-4} D + 6.2 \times 10^{-9} D^2$$

$$f_2 = \frac{8.17 \times 10^{(8 - 1990/\theta)}}{1 + 0.0018 (S - 35)} \quad (\text{kHz}) \quad (4)$$

(4)式の A_1 において、pH は主にホウ酸の寄与に影響を与えている。最近の研究で、大気中の CO_2 の増加により海洋に溶け込む量が増え、海水が酸性化して pH の値が低下し、低周波域の音波伝搬において、吸収損失が小さくなるという問題が提起され、さかんに議論されている^{22) 23)}。

4. プログラムの構成

4.1 直接計算プログラム

計算サイトには、Fig. 2 に示した <http://www.>

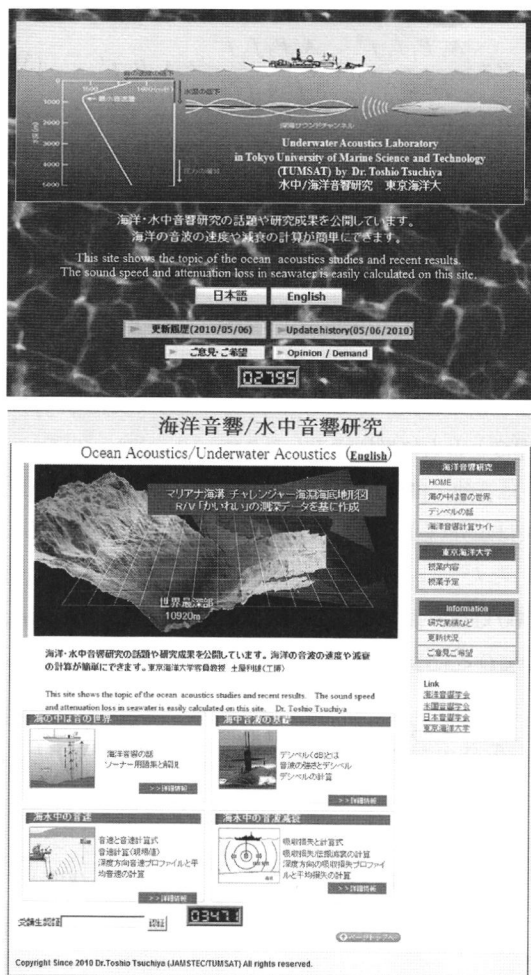


Fig. 2 海洋音響計算サイト (<http://www.tsuchiya2.org/>)
トップページ(上) 日本語トップページ(下)

[tsuchiya2.org/](http://www.tsuchiya2.org/) のトップページから入ることができる。
なお、日本語ページの他に、英語ページも用意している。

直接計算では、各算出式で現場音速や吸収損失(伝搬損失)を簡易に求めるものである。Fig. 3 に音速直接計算(現場値)の計算プログラムのフロー図を示す。このプログラムは、HTML と PHP の部分に分けられ、HTML では、ネット経由でユーザーがブラウザから入力したパラメータを WEB サーバの PHP プログラムに送信し、実行された計算結果を再び受信し、インターネットを介しユーザーの WEB ブラウザに表示するものである。Fig. 4 の上図は、音速計算(現場値)におけるパラメータ入

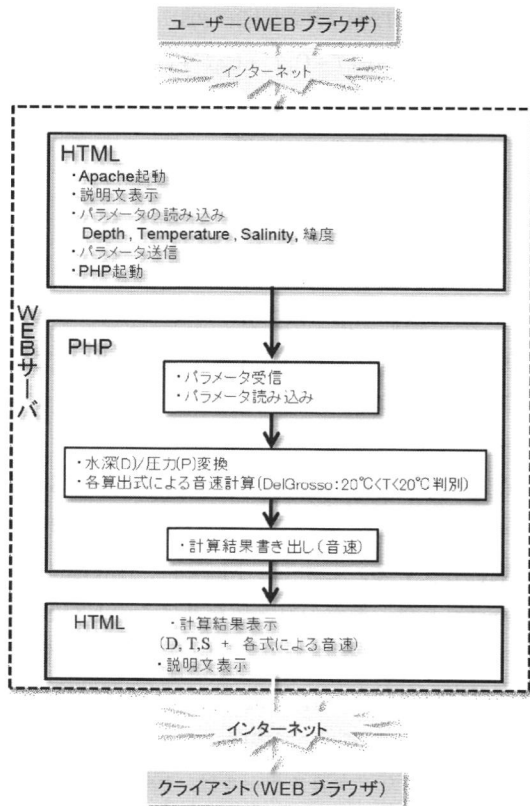


Fig. 3 音速直接計算(現場値)プログラムフロー図

Fig. 4 音速直接計算(現場値)
入力画面例(上) 計算結果(下)

力画面である。ここでは、計算に必要なパラメータである、水温、塩分、深度及び緯度を入力する。ここでの緯度情報の入力、深度から圧力に変換する際に重力による影響を補正するために使われ

る。計算出力結果を Fig. 2 下図に示す。この図のように、計算結果として入力パラメータと現場圧力及び各算出式における音速値(現場値)が表示されるので、各式による音速の違いを比較することができる。また、WEB ブラウザ上のこれらの値は、コピー/ペーストなどの簡易な作業で他のソフトで利用することができる。

Fig. 5 に吸収損失/伝搬減衰(現場値)直接計算プログラムのフロー図を示す。Fig. 5 のように、計算には、DTS の他にパラメータとして周波数 f (kHz) や pH、伝搬距離 (km) が必要となる。Fig. 6 の上図は、吸収損失・伝搬減衰 TL の直接計算(現場値)サイトの入力画面である。ここでは、パラメータとして、海水中的の水深、水温、塩分の他に送信周波数と伝搬距離及び pH を入力する。また、伝搬モードとして、球面拡散か円筒拡散をラジオボタンで選択することができる。ただし、pH の値は、Thorpe

Fig. 6 吸収損失/伝搬減衰直接計算(現場値) 入力画面(上) 計算結果(下)

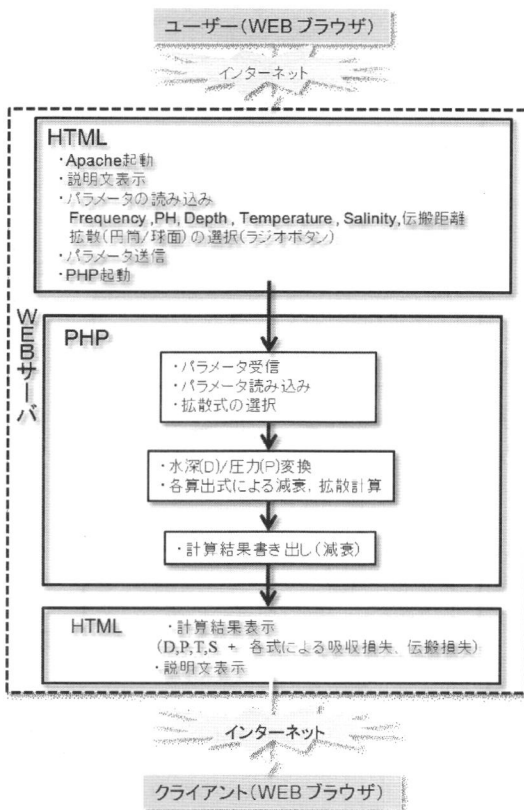


Fig. 5 吸収損失/伝搬減衰(現場値)計算プログラムフロー

や Schulkin and Marsh の式において計算項が存在しないため計算結果に反映されない。計算結果の表示例を Fig. 6 の下図に示す。計算結果として、それぞれの算出式により求められた吸収損失(dB/km)や伝搬距離を基に計算された伝搬減衰が表示され、ユーザーは、それぞれの式による違いを比較することもできる。

4.2 深度方向のプロファイル計算

音速や吸収損失の鉛直(深度方向)プロファイルや平均値は、測深器や魚群探知器の設計には、不可欠なファクターである。このサイトでは、水深 D 、水温 T 、塩分 S データの CSV ファイルをアップロードすることにより、音速や吸収損失深度方向のプロファイルを簡単に求めることができる。

まず、ユーザーは、観測値として Fig. 7 のような「深度 D 、水温 T 、塩分 S 」(以下 DTS と略す)の CSV(カンマ切り)データファイルを用意する。もし、観測値が手元にない場合は、様々な観測値の

Depth (m)	Temperature (°C)	Salinity (‰)	Sound Speed (m/s)
5.27	0917.35	2107	
6.27	0917.35	2109	
7.27	0883.35	2111	
8.27	087.35	2111	
9.27	0846.35	2111	
10.27	0845.35	2112	
11.27	0844.35	2112	
12.27	0823.35	2111	
13.27	0797.35	2113	
14.27	0741.35	2112	
15.27	0579.35	2121	
16.27	0447.35	2127	
17.27	0314.35	2133	
18.27	0203.35	2138	
19.27	0144.35	2144	
20.27	0121.35	2146	
21.27	0094.35	2148	
22.27	0078.35	2147	
23.27	0002.35	2151	
24.26	9854.35	2157	

Fig. 7 プロファイル計算に使われる CSV ファイルの例 (テキストエディタの画面)

左から、水深 (m)、水温 (°C)、塩分 (‰)

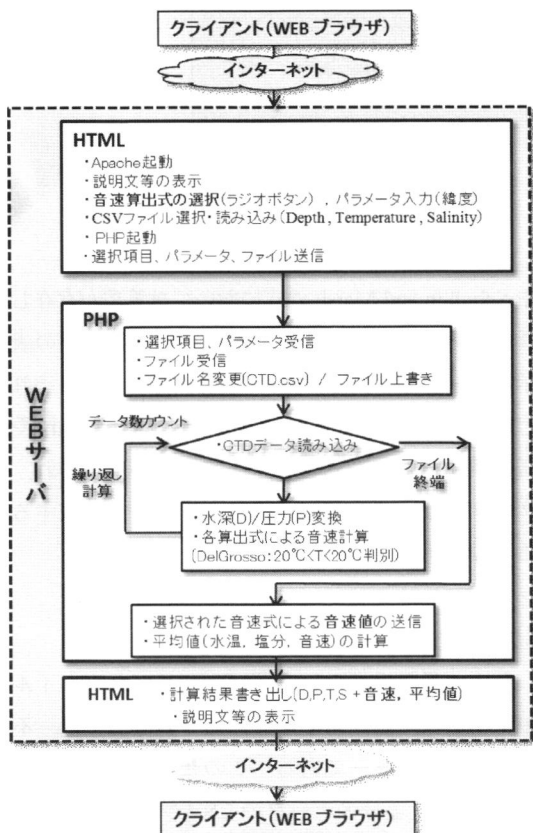


Fig. 8 音速プロファイル / 平均値計算のプログラムフロー

公開 WEB サイト、例えば、

・ JODC の WEB サイト [http://jdoss1.jodc.go.jp/cgi-](http://jdoss1.jodc.go.jp/cgi-bin/2001/feti_scalar.jp)

[bin/2001/feti_scalar.jp](http://jdoss1.jodc.go.jp/cgi-bin/2001/feti_scalar.jp)

・ JAMSTEC の WEB サイト <http://www.godac.jamstec.go.jp/cruisedata/j/>

などから DTS データをダウンロードし、別の解説サイト (http://www.tsuchiya2.org/CSV_file_seisaku/page1.htm) を参考にしながら EXCEL などで加工すれば簡単に CSV ファイルを作成することができる。その CSV ファイルを計算サイトにアップロードすることにより、選択した算出式により鉛直プロファイルや平均値を計算することができる。

Fig. 8 に音速計算、Fig. 9 に吸収損失計算サーバにおける計算フローを示す。これらの図中での HTML 部分では、入力したパラメータをブラウザからサーバの PHP 部分に受け渡し、実行された計算結果を HTML としてインターネット経由で WEB ブラウザに表示するものである。図中、記録されたループの繰り返し数からデータ数がカウ

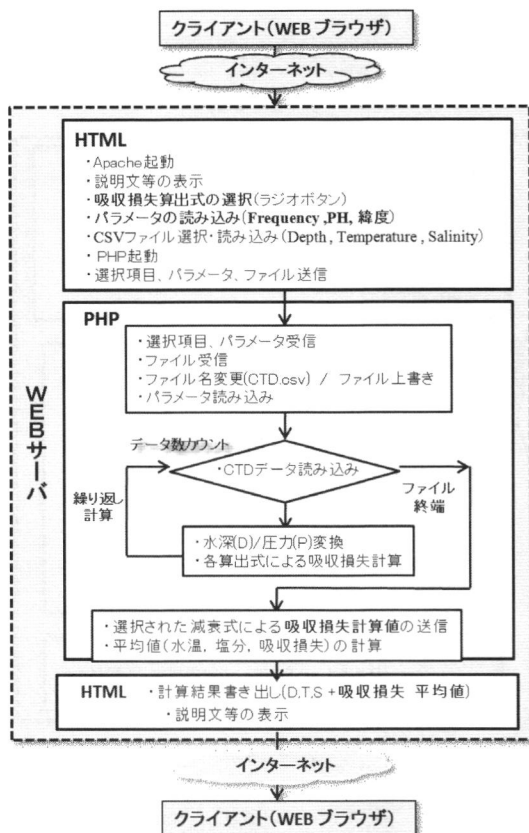


Fig. 9 吸収損失プロファイル / 平均値計算のプログラムフロー

ントされ、平均値(水温、塩分、音速、吸収減衰)の計算に使われる。このフロー図では、入力されたCSVファイルはただちにCTD.csvというファイル名に変更され、前の計算ファイルに上書きするようにしている。これは、サーバ上で複数のデータファイルが残らないようにするための工夫であり、これによりユーザーがアップロードするファイルの大きさに制限を設けなくても問題が発生しなくなった。

音速プロファイル計算におけるパラメータ入力画面をFig. 10の上図に示す。ここで、観測地点の緯度を入力して、予めパソコン内に用意しておいたDTSファイルを選択し、計算式をラジオボタンで選択すると計算が行われる。Fig. 10下図に音速プロファイル計算結果表示画面の例を示す。この例では、データは約3500行になるが、サーバでの計算時間は殆どかからず、表示までの時間は、ネットワークの速度に依存する。Fig. 10下図のように

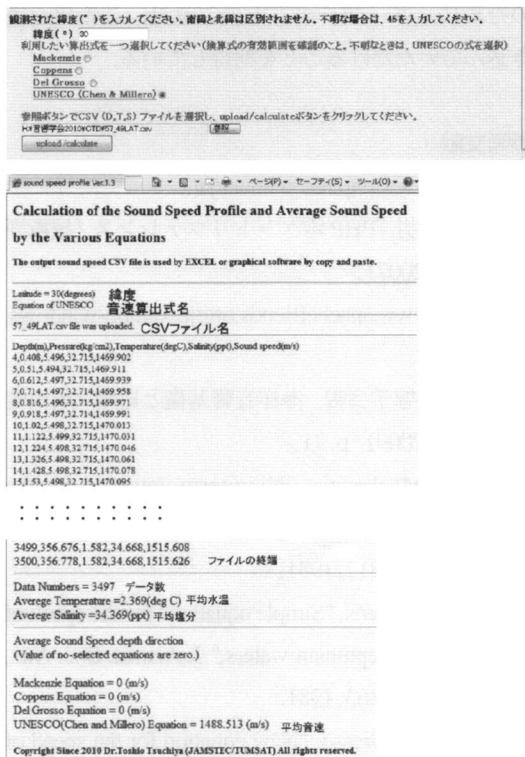


Fig. 10 音速プロファイル / 平均値計算
入力画面(上) 計算結果(下)

計算結果もCSV(カンマ切り)であり、ブラウザ上からコピー / ペースト作業により、容易にEXCELなどの表計算プログラムに取り込むことができる。その他の計算結果として、各平均値(水温、塩分、音速)と全データ数(行数)が表示される。

Fig. 11 上図に深度方向の吸収損失プロファイル計算におけるパラメータ入力画面を示す。ここでは、送信周波数とpH(水素イオン指数)を入力し、計算式をラジオボタンで選択して、DTSファイルをアップロードすると計算が実行される。計算結果をFig. 11下図に示す。なお、今まで推奨されてきたFrancois and Garrisonの式では、計算有効範囲が水深3500 mまでとされているため、より大深度

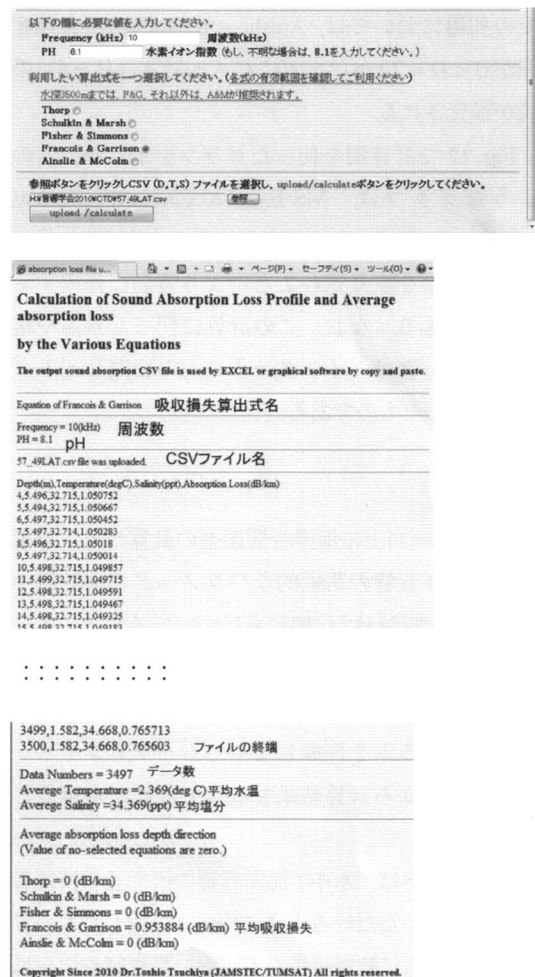


Fig. 11 吸収損失プロファイル / 平均値計算
入力画面(上) 計算結果(下)

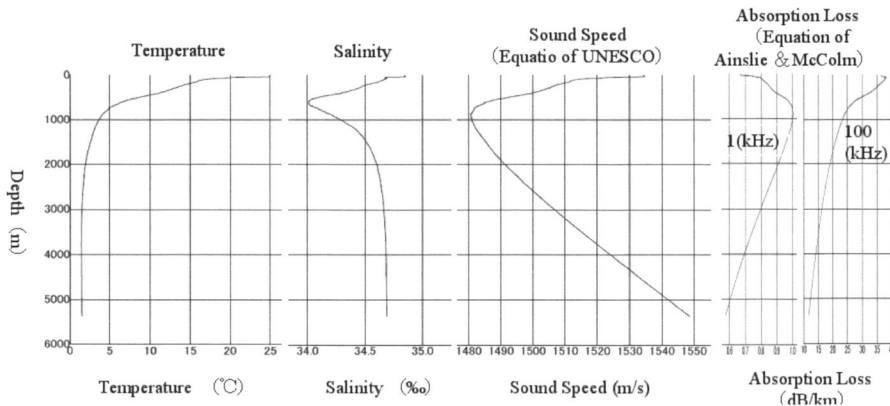


Fig. 12 プロファイル計算結果のグラフの例
北緯 30.4898°, 東経 178.9803°
2007 年 11 月 7 日

での利用においては, Ainslie and McCole (有効範囲が $0 < D < 7$ km ($T = 10^\circ\text{C}$, $S = 35$ ‰ pH = 8)) の式が推奨される。

Fig. 12 で計算例を使ったグラフを示した。このようなグラフは, MS Excel や Origin(<http://www.lightstone.co.jp/origin/index.htm>) などの描画ソフトに計算結果を取り込むことにより容易に作成することができる。なお, この計算に使った水温や塩分等のデータは, インターネットの公開サイト²⁴⁾から取得したものである。

5. まとめ

WEB サーバ上に海洋音響関連の計算サイトを構築し, 海洋音響の基礎的なパラメータである海中の音速や吸収減衰 / 伝搬減衰についてインターネットを介して誰でも簡単に計算できるようにした。これによりネット環境さえあれば, ユーザーは, 計算プログラムを作成しなくてもパソコンやネット端末などから計算結果を取得することが可能となった。

このサイトは, 水中 / 海洋音響の研究者や技術者に活用していただけるように作成・公開したものであるが, さらに教育現場などにおいて教師や学生にも利用いただければ幸いである。なお, この計算サイトをより多くの方々にご利用いただけるよう海

洋音響学会 WEB サイト(<http://www.masj.jp/>)のトップページからもリンクを張っていただいたが, より多くのサイトからのリンクを希望している。

今後は海洋音響の研究に役立つサイトとして徐々に内容を充実させていくつもりであるが, そのために, ユーザーの方々のご意見, ご希望を書き込んでいただけることを期待している。

参考文献

- 1) <http://www.php.net/manual/ja/>
- 2) 大垣靖男, PHP ポケットリファレンス (技術評論社, 2007)。
- 3) <http://www.apachefriends.org/jp/xampp-windows.html>
- 4) 海洋音響学会編, 海洋音響基礎と応用 (成山堂書店, 2009), p. 71。
- 5) K. V. Mackenzie, "Nine-term equation for the sound speed in the oceans," J. Acoust. Soc. Am., **70**(3), 807-812, 1981。
- 6) A. B. Coppens, "Simple equations for the speed of sound in Neptunian waters," J. Acoust. Soc. Am., **69**(3), 862-863, 1981。
- 7) V. A. Del Grosso, "New equation for the speed of sound in natural waters (with comparisons to other equations)," J. Acoust. Soc. Am., **56**(4), 1084-

- 1091, 1974.
- 8) C-T. Chen and F. J. Millero, "Speed of sound in seawater at high pressures," J. Acoust. Soc. Am., **62**(5), 1129-1135, 1977.
- 9) N. P. Fofonoff and R. C. Millard Jr., "Algorithms for computation of fundamental properties of seawater," UNESCO technical papers in marine science. No. 44, Division of Marine Sciences. UNESCO, Place de Fontenoy, 75700 Paris, (1983).
- 10) C. S. Meinen and D. R. Watts, "Further evidence that the sound-speed algorithm of Del Grosso is more accurate than that of Chen and Millero," J. Acoust. Soc. Am., **102**(4), 2058-2062, 1997.
- 11) B. D. Dushaw, P. F. Worcester, B. D. Cornuelle and B. M. Howe, "On equations for the speed of sound in sea water," J. Acoust. Soc. Am., **93**(1), 255-275, 1993.
- 12) C. C. Leroy, S. P. Robinson and M. J. Goldsmith, "A new equation for the accurate calculation of sound speed all ocean," J. Acoust. Soc. Am., **124**(5), 2774-2778, 2008.
- 13) C. C. Leroy and F. Parthiot, "Depth-pressure relationship in the oceans and seas," J. Acoust. Soc. Am., **103**(3), 1346-1352, 1998.
- 14) G. S.K.Wong and Zu, "Speed of sound in seawater as a function of salinity, temperature and pressure," J. Acoust. Soc. Am., **97**, 1732-1736, 1995.
- 15) W. H. Thorp, "Analytic description of the low frequency attenuation coefficient," J. Acoust. Soc. Am., **33**, 334-340, 1961.
- 16) Schulkin M. and Marsh H.W., "Sound absorption in seawater," J. Acoust. Soc. Am., **34**, 864-86, 1962.
- 17) Fisher F. H. and Simmons V. P., "Sound absorption in seawater," J. Acoust. Soc. Am., **62**, 558-564, 1977.
- 18) Francois R. E. and Garrison G. R., "Sound absorption based on ocean measurements: Part I: Pure water and magnesium sulfate contributions," J. Acoust. Soc. Am., **72**(3), 896-907, 1982.
- 19) Francois R. E. and Garrison G. R., "Sound absorption based on ocean measurements: Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption," J. Acoust. Soc. Am., **72**(6), 1879-1890, 1982.
- 20) Ainslie M. A. and McColm J. G., "A simplified formula for viscous and chemical absorption in sea water," J. Acoust. Soc. Am., **103**(3), 1671-1672, 1998.
- 21) 許正憲, 土屋利雄, 中西俊之, 網谷泰孝, "海水中における鉛直方向の音波の減衰について," 海洋科学技術センター試験研究報告, **23**, 31-41, 1990.
- 22) K. C. Hester, E. T. Peltzer, W. J. Kirkwood and P. G. Brewer, "Unanticipated consequences of ocean acidification: A noisier ocean at lower pH," Geophys. Res. Lett., **35**(19), L19601, 2008.
- 23) 土屋利雄, "二酸化炭素に起因する海洋酸性化による音波伝搬損失への影響", 信学技報, **110**(186), 7-11 (2010).
- 24) <http://www.godac.jamstec.go.jp/cruisedata/j/>